

поверхности, выходной сигнал электрометрического зонда содержит значительную по амплитуде переменную составляющую, причем при синусоидальной модуляции зазора в динамическом конденсаторе результирующий сигнал не является синусоидальным, а содержит значительные гармонические искажения. В то же время, полученная в результате моделирования осциллограмма отличается от формы сигнала, получаемого при контроле дефектов поверхностей проводящих и полупроводниковых поверхностей [2]. Это позволяет предполагать возможность различения места локализации дефекта (подложка или диэлектрическое покрытие) в

композитных структурах, к примеру, структурах кремний-диэлектрик, на основе анализа спектрального состава измерительного сигнала.

1. Тявловский, А.К. Математическое моделирование дистанционной зависимости разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1(4). – С. 30-36.

2. Tyavlovsky, A. Complex-harmonic analysis of electric circuit containing a vibrating-plate capacitor / A. Tyavlovsky, A. Zharin // Informatyka, Automatyka, Pomiarы w gospodarce i ochronie srodowiska. – 2012. – № 1. – P. 32-35.

УДК 681.7.023.72

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВУСТОРОННЕГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДВОЯКОВЫПУКЛЫХ ЛИНЗ

Филонова М.И., Кузнецик В.О., Семенкович В.П., Тищенко А.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В традиционной технологии финишного формообразования высокоточных линз выбор режимов обработки в каждом конкретном случае определяет оператор опытным путем, что приводит к непроизводительным затратам времени и, следовательно, повышает себестоимость продукции.

Отмеченных недостатков можно избежать, если провести предварительный расчет интенсивности съема материала в той или иной зоне детали в зависимости от величины наладочных параметров станка. В основу такого моделирования процесса обработки целесообразно положить гипотезу Ф. Престона, согласно которой производительность обработки пропорциональна при прочих равных условиях параметру  $Q = pl$ , где  $p$  – давление в зоне соприкосновения притирающихся поверхностей инструмента и детали,  $l$  – длина пути трения произвольно выбранной на поверхности детали опорной точки  $A$  относительно инструмента.

Для определения составляющей  $l$  параметра  $Q$  найдем линейную скорость скольжения  $\vec{v}_{ск}$  опорной точки по формуле

$$\vec{v}_{ск} = \vec{v}_д - \vec{v}_и, \quad (1)$$

где  $v_д$  – линейная скорость вращения детали;  $v_и$  – линейная скорость движения инструмента, которую можно представить в виде

$$\vec{v}_и = \vec{v}_в - \vec{v}_{вв}, \quad (2)$$

где  $v_в$  и  $v_{вв}$  – составляющие линейной скорости инструмента, обусловленные его вращательным и возвратно-вращательным движениями;  $i = 1, 2$ .

Входящие в выражения (1) и (2) линейные скорости представим в виде

$$(3) \quad \begin{cases} \vec{v}_A = \vec{\omega}_д \vec{r}_i \\ \vec{v}_{ив} = \vec{\omega}_и \vec{r}_i \\ \vec{v}_{ик} = \vec{\Omega}_и \vec{r}_i, \end{cases}$$

где  $\omega_д$ ,  $\omega_и$  и  $\Omega_и$  – скорости вращения соответственно детали, инструмента и возвратно-вращательного движения последнего, причем, согласно [1],  $\omega_и = (0,7 \div 0,9) \omega_д$ ;  $r_i$  – радиус кривизны обрабатываемой поверхности.

Выражение для расчета скорости  $\Omega_и$  получим из рис. 1, на котором представлена векторная кинематическая схема рабочей зоны устройства для одновременной двусторонней обработки двояковыпуклых линз [2], устанавливаемого на серийные шлифовально-полировальные и полировально-доводочные станки мод. ШП и ПД.

Определим далее составляющую  $p$  параметра  $Q$ . На рис. 2 представлено распределение давления в зоне контакта детали  $1$  с инструментом  $2$  в различных его положениях при возвратно-вращательном движении по обрабатываемой поверхности.

Если принять, что инструмент в процессе обработки не деформируется, то когда он не выходит за край детали, т.е. амплитуда его возвратно-вращательного движения не превышает величины  $L_{min} = (d_д - d_и)/2$ , где  $d_и$  – диаметр инструмента (инструмент в положении I на рис. 2, а), давление по всей поверхности сопряжения притирающихся поверхностей распределено равномерно и принимает значение  $p_0 = Q/S_n$ , где  $Q$  – рабочее усилие,  $S_n$  – максимальная площадь сопряжения, равная площади инструмента. Если

же упомянутую амплитуду назначить максимальной  $L_{max} = d_d$  (инструмент в положении II на рис. 2, а), то в краевой точке детали давление достигнет максимального значения  $p_{max} = Q_b/S_{ед}$ , где  $Q_b = Q \cos \gamma_d$  – вертикальная составляющая силы  $Q$ ,  $S_{ед}$  – единичная площадь контакта,  $\gamma_d$  – угол раствора линзы.

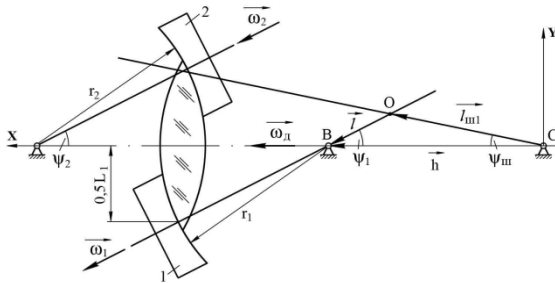


Рисунок 1 – Кинематическая схема рабочей зоны устройства

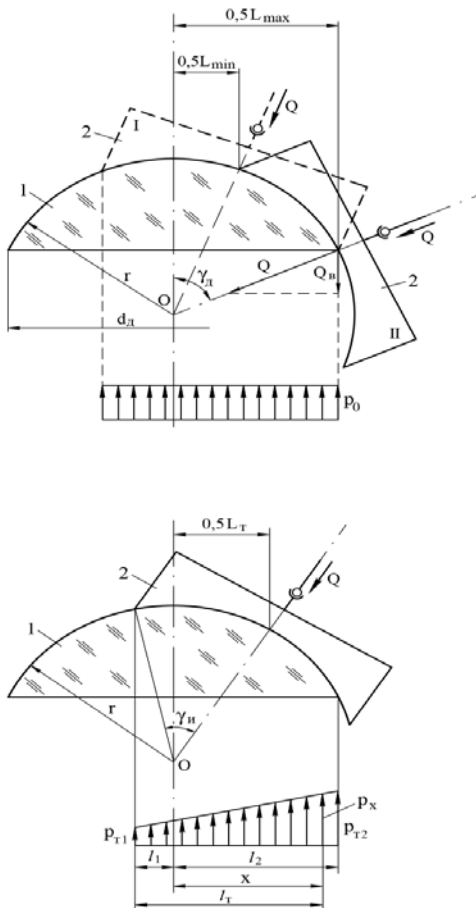


Рисунок 2 – Распределение давления в зоне контакта детали 1 с инструментом 2 при возвратно-вращательном движении по обрабатываемой поверхности а) инструмент в положении I, II; б) положение инструмента в произвольный момент времени

На рис. 2, б приведено положение инструмента в произвольный момент времени, когда его амплитуда возвратно-вращательного движения принимает текущее значение  $L_T$ . Будем полагать, что в этом случае эпюра давления в зоне сопряжения имеет трапецевидную форму. Тогда, как следует из анализа рис. 2, б, текущее значение давления  $p_T$  на расстоянии  $x$  от оси вращения детали можно записать в виде

$$p_T = \frac{p_{T2} - p_{T1}}{l_1 + l_2} l_T, \quad (4)$$

где  $p_{T1} = p_0 - \frac{p_0}{L_{max} + L_{min}}$  и  $p_{T2} = p_0 - \frac{p_{max}}{L_{max} + L_{min}} (L_T - L_{min})$  – соответственно минимальное и максимальное значения давления в текущей эпюре;  $l_1 = r \sin[\gamma_u - \arcsin(L_T/2r)]$  и  $l_2 = l_1 + x$  – расстояния от края инструмента, контактирующего с деталью, до соответственно оси вращения последней и до рассматриваемой точки с текущим давлением  $p_T$ ;  $x$  – расстояние от оси вращения детали до точки с давлением  $p_T$ ,  $\gamma_u$  – угол раствора инструмента;  $l_2 = 0,5d_d$ .

При записи аналитических выражений для  $p_T$ ,  $p_{T1}$  и  $p_{T2}$  исходили из следующих соображений. Поскольку значение  $p_{T1}$  не должно быть больше  $p_0$ , то можно считать, что оно уменьшается на некоторую величину  $\frac{p_0}{L_{max} + L_{min}} (L_T - L_{min})$  в виде значения  $p_0$  приходящегося на единицу длины части амплитуды  $(L_T - L_{min})$ , в пределах которой происходит изменение эпюры давления, и умноженного на переменную составляющую  $(L_T - L_{min})$ , отображающую функциональную зависимость  $p_{T1}$  от амплитуды возвратно-вращательного перемещения инструмента.

По аналогичной схеме записано соотношение для  $p_{T2}$ .

Равенство для текущего давления  $p_T$  представляет собой переменную часть эпюры давления  $(p_{T2} - p_{T1})$ , умноженную на изменяющуюся величину  $l_T$  и отнесенную к длине сечения зоны контакта инструмента и детали плоскостью, содержащей их оси вращения.

Используя выражение (4), выполнили расчет параметра  $Q$  для линзы с  $R_1 = 71,26$  мм,  $R_2 = 540,58$  мм и  $d_d = 90$  мм в зависимости от изменявшихся значений диаметра инструмента, величины амплитуды его возвратно-вращательного движения, а также скоростей вращения детали и входного звена исполнительного механизма базового станка. Данные получены для поверхности с  $R_1 = 71,26$  мм.

С целью проверки соответствия результатов расчетов реальным закономерностям проводили полирование выпуклой сферической поверхности  $R_1 = 71,26$  мм линзы диаметром 90 мм, изготовленной из оптического стекла марки К8, на

устройстве для двусторонней обработки двояковыпуклых линз, смонтированном на базовом станке мод. БПД-100. Выполненные теоретико-экспериментальные исследования закономерностей двусторонней обработки двояковыпуклых линз позволяют сделать следующие выводы:

а) из наладочных параметров рычажных шлифовально-полировальных и полировально-доводочных станков для управления процессом формообразования наиболее выгодно изменять амплитуду возвратно-вращательного перемещения инструмента и его диаметр.

б) с целью уменьшения величины локальных погрешностей на поверхности линзы такие наладочные параметры технологического оборудования, как скорости вращения входного звена его исполнительного механизма и детали, следует устанавливать минимальными. При этом для

усиления съема припуска в центральной зоне обрабатываемой поверхности необходимо использовать диаметр инструмента  $d_{и} = (0,8 - 0,85)d_{д}$ , а амплитуду его колебательных движений  $L$  назначать  $(0,6 - 0,62)d_{д}$ . Для более интенсивной обработки периферии детали целесообразно применять  $d_{и} = (0,96 - 1,0)d_{д}$  и  $L = (0,77 - 0,8)d_{д}$ .

1. Бардин А.Н. Технология оптического стекла. М., 1963.
2. Устройство для одновременной двусторонней обработки оптических деталей с выпуклыми поверхностями: пат. 9420 РБ, МПК В24В 13/00 / А.С. Козерук, М.И. Филонова, В.Ф. Климович, И.В. Рутик, Е.Н. Горбаченя, опубл. 2007.06.30.

УДК 621.357.7

### ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА СВОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Хмыль А.А., Кушнер Л.К., Кузьмар И.И., Василец В.К., Дежкунов Н.В.

УО «БГУИР»

Минск, Республика Беларусь

В современной технологии радиоэлектронного приборостроения широко используются функциональные электрохимические покрытия. Однако многие существующие процессы их формирования на постоянном токе малопродуктивны. В электрохимической практике для интенсификации процесса электроосаждения успешно применяются ультразвуковые колебания (УЗК) низкой частоты, что позволяет повысить скорость обновления электролита у катода, вследствие чего увеличивается коэффициент диффузии ионов и уменьшается толщина диффузионного слоя, что приводит к значительному увеличению предельной плотности тока [1].

Представлены результаты исследования влияния ультразвука различной интенсивности на функциональные свойства никелевых покрытий, модифицированных частицами ультрадисперсного алмаза (УДА), и покрытий сплавом олово-висмут.

Электроосаждение и контроль режимов электролиза осуществляли с применением разработанных в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники высококачественного источника питания гальванической ванны импульсно-реверсным током ИП 15-5 и ультразвуковой экспериментальной установки, включающей генератор УЗГ53-22 с пьезокерамическим излучателем, работающей на частоте 38 кГц и обеспечивающей акустическую мощность 15 Вт и интенсивность УЗК до 2,1 Вт/см<sup>2</sup> (рисунок 1) [2].

Электроосаждение никелевых покрытий проводили в электролите Уоттса. Введение в электролит предварительно диспергированной в ультразвуке суспензии УДА позволяет формировать композиционные электрохимические покрытия (КЭП) с содержанием дисперсной фазы до 1,2 масс.%. Покрытие сплавом олово-висмут формировали из сульфатного электролита.

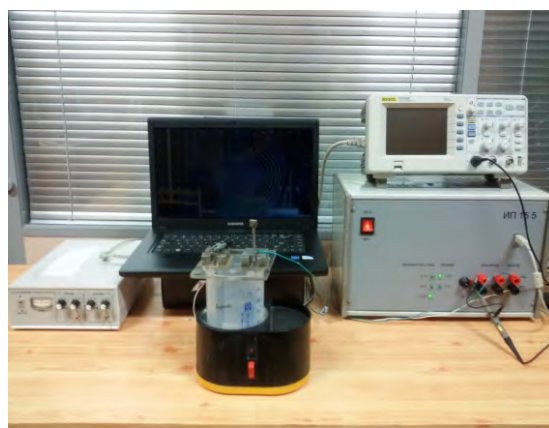


Рисунок 1 - Программно-аппаратный комплекс, включающий управляющий компьютер, программно управляемый источник стабилизированного импульсного тока (напряжения), осциллограф и макет ультразвуковой ванны

Формирование никелевых КЭП в ультразвуковом поле позволило повысить допустимую плотность тока и равномерность, устранить пит-